

В.И. Исаев, Н.А. Волкова, Т.В. Ним

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГЕОТЕРМИИ В УСЛОВИЯХ СЕДИМЕНТАЦИИ

На основе постановки и базовых уравнений Я.Г. Гольмштока на ЭВМ реализована программа решения прямой задачи геотермии в условиях осадконакопления - расчет распределения температур в осадочной толще на любой заданный момент геологического времени. В решении ряд интегралов сведен к явному виду, численное интегрирование выполняется с заранее заданной точностью. Сформулирована обратная задача геотермии - определение неискаженного осадконакоплением теплового потока из основания по температурным наблюдениям в скважине. Решение обратной задачи на ЭВМ осуществляется методом квадратичного программирования В.И. Старостенко, погрешность вычислений - в пределах 4%. Эффективность программ иллюстрируется модельными примерами и решением задачи палеотемпературной оценки фазового состояния углеводородов осадочных толщ.

Для целенаправленного и обоснованного прогноза нефтегазоносности необходимо знать условия формирования скоплений углеводородов (УВ) в осадочных толщах. Среди этих условий тепловой режим является одним из главных. Изучение палеотемпературного режима осадочных бассейнов осуществляется палеогеохимическим методом (методом палеотемпературных реконструкций, методом палеофилирования) [4, 10, 16 и др.], основанном на учении о стадийности процессов нефтегазообразования [6].

Определяющим моментом в методике построения палеофиля является расчет палеотемператур собственно в осадочной толще. В работе [12] рассмотрены основные модели осадконакопления и алгоритмы решения задачи расчета температур в осадочном слое. Существенным недостатком аналитических решений прямой задачи геотермии в условиях осадконакопления, приведенных Г. Карслоу и Д. Егером [9], А. Бенфилдом [17] и Ф. Берчем [18], является равенство теплофизических параметров осадков и подстилающего основания. Ограниченность аналитического решения Р.И. Кутаса [11] заключается в неучете радиогенной составляющей осадков и весьма условном законе осадконакопления.

Решения более общего характера и практически в одной постановке получены А.Я. Гольмштоком [5], Ю.И. Галушкиным и Я.Б. Смирновым [3]. Здесь привлекались численные методы решения. Громоздкость выражений и возможная неадекватность применяемых способов численного интегрирования приводит к различным значениям распределений температур в осадках [12]. Поэтому отмечена необходимость дальнейших теоретических и модельных исследований решения прямой задачи геотермии в условиях осадконакопления.

В настоящей статье приведены результаты решения прямой задачи на основе постановки и базовых

выражений, полученных А.Я. Гольмштоком. Здесь наиболее полно учитываются основные факторы: формирующие тепловое поле осадочных бассейнов: затраты энергии теплового потока из основания на прогрев холодного осадочного материала; частичное экранирование теплового потока из-за различия теплофизических свойств осадков и пород основания; теплогенерация в накапливающихся осадках; различная скорость осадконакопления. Ряд интегралов сведен к явному виду, что сокращает вычислительные затраты при реализации на ЭВМ. Те расчеты, которые осуществляются методами численного интегрирования, обеспечены процедурами, позволяющими получить конечный результат (распределения температур) с заранее заданной точностью.

Поставлена и решена задача расчета значения теплового потока из основания по температурным наблюдениям в скважинах - обратная задача геотермии в условиях седиментации. Задача сформулирована как задача квадратичного программирования с линейными ограничениями на неизвестные. Для решения этой задачи адаптировано программное обеспечение, ранее разработанное для решения обратной линейной задачи гравиметрии [7].

Реализация математической модели осадконакопления и алгоритмов решения прямой и обратной задач геотермии осуществлена на ЭВМ ЕС в Информгеоцентре ГП "Востокгеология". Применение программ демонстрируется на модельных примерах и решением задачи прогноза нефтегазоносности осадочного разреза Луньского прогиба на Сахалине.

ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Прямая задача. В принятой модели рассматривается двуслойная среда с произвольным распределением источников в каждом слое (рис. 1). Начало

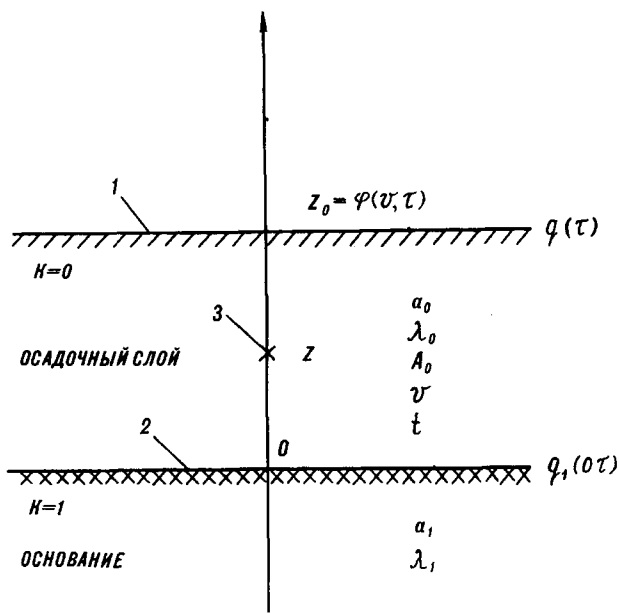


Рис. 1. Схематическое изображение среды при решении задач геотермии.

1 - поверхность осадков; 2 - поверхность основания; 3 - точка расчета температуры; k - индекс слоя; Z_0 - мощность осадков; a_k - теплопроводность; λ_k - теплопроводность; A_0 - удельная теплогенерация; ν - скорость осадконакопления; t - текущее время, t - полное время осадконакопления; $q(\tau)$ - поверхностный тепловой поток; $q_1(0, \tau)$ - тепловой поток через основание.

системы координат расположено на поверхности основания $Z=0$. Начиная с момента времени $t=0$ на поверхности основания накапливаются осадки. Мощность осадочного слоя изменяется во времени по произвольному закону $\zeta=\varphi(\nu, \tau)$, где ν - скорость осадконакопления, τ - текущее время. Тепло- и теплопроводность каждого слоя равны соответственно λ_k и a_k ($k=0,1$). Удельная теплогенерация распределенных в осадках радиоактивных источников A_0 . На подвижной поверхности осадков поддерживается температура, равная нулю.

Распределение температур в осадочном слое описывается

$$\begin{aligned}
 U_0(Z, t) = & -\frac{a_0}{\lambda_0} \int_0^t q(\tau) \cdot \{G_0(Z, t; \varphi(\nu, \tau), \tau) - \\
 & -G_0(Z_0, t; \varphi(\nu, \tau), \tau)\} d\tau + \frac{a_0}{\lambda_1} \int_0^t q_1(0, \tau) \cdot \{G_1(Z, t; 0, \tau) - \\
 & -G_1(Z_0, t; 0, \tau)\} d\tau + \frac{a_0}{\lambda_0} \int_0^t \int_0^{\varphi(\nu, \tau)} A_0 \{G_0(Z, t; \zeta, \tau) - \\
 & -G_0(Z_0, t; \zeta, \tau)\} d\zeta \cdot d\tau, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $q_1(0, \tau)$ - тепловой поток через поверхность основания; $q(\tau)$ - тепловой поток через поверхность накапливающихся осадков;

$Z_0=\varphi(t)$ - поверхность осадков; $G(Z, t; \zeta, \tau)$ - функция источника.

Для расчета в соответствии с (1) распределения температур в любой точке осадочной толщи в любой момент времени нужно задать $\nu, \tau, \lambda_0, \lambda_1, a_0, a_1, A_0, q_1(0, \tau), q(\tau), G(Z, t)$.

Параметры осадконакопления, теплофизические параметры осадков и подстилающего основания задаются по экспериментальным данным.

Вычисление температурного вклада глубинных источников тепла в общий баланс температуры, т. е. вычисление интеграла, представляющего второе слагаемое в формуле (1), осуществляется следующим образом.

Если тепловой поток через поверхность основания постоянен $q_1(0, \tau)=const$, то интеграл считается по приведенной аналитической формуле

$$\begin{aligned}
 & \frac{a_0}{\lambda_1} \int_0^t q_1(0, \tau) \{G_1(Z, t; 0, \tau) - G_1(Z_0, t; 0, \tau)\} d\tau = \\
 & = \frac{a_0}{\lambda_1} q_1(1+b) \cdot \sqrt{\frac{a_0}{a_1}} \left\{ \sqrt{\frac{t}{\pi a_1}} \cdot \left(e^{-\frac{Z}{4a_1 t}} - e^{-\frac{\varphi(t)}{4a_1 t}} \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\varphi(t)}{2a_1} \operatorname{erfc} \left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_1 t}} \right) - \frac{Z}{2a_1} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{a_1 t}} \right) \right\}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\text{где: } b = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \sqrt{\frac{a_0}{a_1}} \right) / \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} + \sqrt{\frac{a_0}{a_1}} \right). \quad (3)$$

Если тепловой поток через поверхность основания нестационарен, то интеграл вычисляется с заданной погрешностью численным методом по правилу трапеций с экстраполяцией по методу Ромберга. Для этого используется стандартная программа DQART[13].

Вычисление температурного вклада радиоактивных источников тепла, расположенных в слое осадков, в общий баланс температуры, т. е. вычисление интеграла, представляющего третье слагаемое в формуле (1), осуществляется следующим образом.

Интеграл от 0 до $\varphi(\nu, \tau)$ вычисляется по приведенной аналитической формуле

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\varphi(\tau)} \{G_0(Z, t; \zeta, \tau) - G_0(Z_0, t; \zeta, \tau)\} d\zeta = \\
 & = \frac{1}{2} \left\{ -\operatorname{erf} \left(\frac{Z}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{Z-\varphi(\tau)}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) + \right. \\
 & \left. + b \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{Z+\varphi(\tau)}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) - b \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) \right\} +
 \end{aligned}$$

$$+ \operatorname{erf} \left(\frac{\varphi(t)}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\varphi(t) - \varphi(\tau)}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) - \\ - b \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\varphi(t) - \varphi(\tau)}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) + b \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{\varphi(t)}{\sqrt{4a_0(t-\tau)}} \right) \Bigg\}, \quad (4)$$

а внешний интеграл от 0 до t по dt вычисляется с заданной точностью численным методом по правилу трапеций с экстраполяцией по методу Ромберга.

Вычисление температурных потерь через поверхность осадков за счет теплопередачи, т. е. вычисление интеграла, представляющего первое слагаемое в формуле (1), осуществляется следующим образом.

Вычисление интеграла

$$\frac{a_0}{\lambda_0} \int_0^t q(\tau) \cdot \{G_0(Z, t; \zeta, \tau) - G_0(Z_0, t; \zeta, \tau)\} d\tau$$

происходит с помощью стандартной подпрограммы DQTFG [13], представляющей собой интегрирование функции, заданной таблицей значений, по правилу трапеций. Тепловой поток $q(t)$ через поверхность накапливающихся осадков в момент t находится решением уравнения Вольтера II рода

$$q(t) - \int_0^t q(\tau) \cdot K(t, \tau) d\tau = F(t), \quad (5)$$

$$K(t, \tau) = 2a_0 \frac{\partial G_0(Z, t; \zeta, \tau)}{\partial Z} \Big|_{Z=\varphi(t)}, \quad (6)$$

$$F(t) = -2a_0 \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \int_0^t q_1(0, \tau) \frac{\partial G_0(Z, t; 0, \tau)}{\partial Z} \Big|_{Z=\varphi(t)} d\tau -$$

$$-2a_0 \int_0^t \int_0^{\varphi(t)} A_0 \cdot \frac{\partial G_0(Z, t; \zeta, \tau)}{\partial Z} \Big|_{Z=\varphi(t)} d\zeta d\tau. \quad (7)$$

Функция источника в принятой двуслойной модели среды имеет аналитическое описание [5]

$$G_0(Z, t; \zeta, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a_0(t-\tau)}} \left\{ \exp \left(-\frac{(Z-\zeta)^2}{4a_0(t-\tau)} \right) + \right. \\ \left. + b \cdot \exp \left(-\frac{(Z+\zeta)^2}{4a_0(t-\tau)} \right) \right\}, \quad (8)$$

а для подстилающего описания определяется из условия

$$\frac{\partial G_1(Z, t; 0, \tau)}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \frac{\partial G_0(Z, t; 0, \tau)}{\partial Z}. \quad (9)$$

Решение уравнения Вольтерра находится численно по квадратурной формуле трапеций, причем в интервалах, примыкающих к особой линии $\tau=t$, используются соответствующие односторонние пределы [2, 8]. Погрешность решения определяется способом Рунге на сгущающихся сетках [8].

Предусмотрена возможность получения решения уравнения Вольтерра методом последовательных приближений [1, 8]. Если источники тепла в основании стационарны, то [5]

$$q(t) = q_1(1+b) \cdot \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_0 t}} \right) + \int_0^t \operatorname{erfc} \left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_0 t}} \right) \cdot K(t, \tau) d\tau \right\} \quad (10)$$

Если в основании осадочной толщи залегает литосфера, образовавшаяся в процессе рифтогенеза в момент времени T , и

$$q_1(0, t) = \frac{C}{\sqrt{T+t}}, \quad (11)$$

то

$$q(t) = F(t) + \int_0^t F(\tau) \cdot K(t, \tau) \cdot d\tau, \quad (12)$$

$$F(t) = q_1(0, t) \cdot (1+b) \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_0(T+t)}} \right)^2 \right\} \times \\ \times \operatorname{erfc} \left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_0 t}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T+t}} \right). \quad (13)$$

Эти формулы представляют второе приближение, погрешность которого оценивается в 2-10% не более.

Принятая теоретическая разработка [5] здесь приведена для двуслойной модели "основание-осадки". Практически задача решается для сложной осадочной толщи, дифференцированной по скоростям осадконакопления, но с одинаковыми теплофизическими свойствами для всех осадочных слоев. Закон, описывающий рост мощности осадков, представляется в виде кусочно-линейной функции ($l=1, 10$)

$$\zeta = \varphi(v, \tau) = \sum_{j=1}^{l-1} v_j \cdot (t_j - t_{j-1}) + v_l (\tau - t_{l-1}). \quad (14)$$

Обратная задача. Рассматривается случай стационарного теплового потока из основания $q_l = q_l(0, \tau) = \text{const}$. Решение обратной задачи сводится к решению системы линейных уравнений относительно q_l

$$A q_l = B, \quad (15)$$

при условии выполнения ограничений

$$q_l^{(H)} \leq q_l \leq q_l^{(h)}. \quad (16)$$

Приводим уравнение (1) к виду (15) и выделяем операторы A и B .

$$B = U_0(Z, t) - \frac{a_0}{\lambda_0} \int_0^t \int_0^{\varphi(v, \tau)} A_0 \{G_0(Z, t; \zeta, \tau) - G_0(Z_0, t; \zeta, \tau)\} d\zeta d\tau \quad (17)$$

$$A = \frac{a_0}{\lambda_1} \int_0^t \{G_1(Z, t; 0, \tau) - G_1(Z_0, t; 0, \tau)\} d\tau +$$

$$+(1+b) \cdot \frac{a_0}{\lambda_0} \int_0^t \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_0 t}} \right) + \int_0^{\tau} \operatorname{erfc} \left(\frac{\varphi(t)}{2\sqrt{a_0 t}} \right) \cdot K(t, \tau) d\tau \right\} \times \\ \times \{G_0(Z, t; \zeta, \tau) - G_0(Z_0, t; \zeta, \tau)\} d\tau \quad (18)$$

Задача определения q_1 сводится к задаче квадратичного программирования [15] и формулируется так

$$f(q) = \|Aq_1 - B\|^2 + \alpha \|q_1 - q_1^{(0)}\|^2 \leq \varepsilon_u \quad (19)$$

на множестве точек (16),

где A - линейный оператор, характеризующий теплофизические свойства и динамическую структуру среды;

B - температуры, наблюдаемые в осадочной толще (витринитовая палеотермометрия, наблюдения в скважине) с ошибкой $\pm \varepsilon_v$, за вычетом температурного эффекта радиоактивных источников в осадочной толще;

$q_1^{(0)}$, $q_1^{(n)}$, $q_1^{(e)}$ - априорное (начальное), нижнее и верхнее предельные значения искомого неизвестного.

Для решения задачи (19) применяется метод сопряженных градиентов, обобщенный на случай линейных ограничений (16), организованный в виде итерационного процесса [15, с. 61]. Предусмотрена возможность одновременного моделирования значения теплового потока через поверхность основания в поле 50-ти температурных наблюдений в скважине. Осадочный разрез может быть представлен 10-ю стратиграфическими горизонтами.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Тестирование решения уравнения Вольтерра. Для тестирования взята модель осадочной толщи, состоящая из семи слоев, возраст и скорость осадконакопления которых указаны в таблице 1. В пределах каждого слоя скорость осадконакопления постоянна. Нумерация слоев идет снизу.

Таблица 1

Исходные данные для тестирования решения уравнения Вольтерра

№ слоя	Возраст, млн. лет		Скорость осадконакопления, м/тыс. лет
	Подошва слоя	Кровля слоя	
1	67	58	0.244
2	58	20	0.145
3	20	9	0.127
4	9	5.5	0.314
5	5.5	2.0	0.257
6	2.0	0.8	0.425
7	0.8	0	0.737

В качестве параметров осадков и основания приняты следующие значения:

$$a_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda_0 = 1.38 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С};$$

$$a_1 = 7.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda_1 = 2.38 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}.$$

$$A_0 = 12.54 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^3;$$

Просчитаны два варианта:

1) случай стационарного источника в основании, $q_1 = 0.046 \text{ Вт/м}^2$,

2) случай нестационарного источника в основании, $T = 40$ млн. лет.

В особых случаях $t = 67$ млн. лет.

Так как тепловой поток через поверхность накапливающихся осадков складывается из потока, обусловленного глубинными источниками, и потока, обусловленного радиоактивными источниками в осадках, то результаты расчетов представлены в виде таблицы 2.

Таблица 2

Результаты тестирования решения уравнения Вольтерра

Тепло-источник в основании	Результаты Вт/м ²					
	Тепловой поток, обусловленный источником в основании		Тепловой поток, обусловленный радиоактивными источниками в осадках		Сумма	
	Расчет	[5]	Расчет	[5]	Расчет	[5]
Стационарный	0.0224	0.0230	0.0094	0.0097	0.0318	0.0327
Нестационарный	0.0268	0.0269	0.0094	0.0097	0.0362	0.0366

Здесь же приведены результаты расчетов, полученные А.Я. Гольмштоком при названных исходных данных [5]. Сравнение показывает согласованность результатов, что свидетельствует об адекватной реализации на ЭВМ математической модели и методов решения. Погрешность расчетов определена способом Рунге на сгущающихся сетках и составила по абсолютной величине $R = 0.000133...$

Тестирование решения обратной задачи. Модель представляет собой трехслойный разрез терригенной осадочной толщи, подстилаемой гранитизированным основанием (рис. 2). Общая мощность осадков 3540 м, время осадконакопления 16 млн. лет. Скорость осадконакопления первого слоя (от основания) $40.3 \cdot 10^{-13} \text{ м/с}$, второго - $68.3 \cdot 10^{-13} \text{ м/с}$, третьего - $116.9 \cdot 10^{-13} \text{ м/с}$. Удельная теплогенерация осадков $7.5 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^3$, теплопроводность - $1.4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$, температуропроводность - $5.0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Теплопроводность основания - $3.0 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$, температуропроводность - $7.0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

“Наблюдения” температур проведены в скважине на глубинах 0.5 км, 1.0 км, 2.0 км (решена прямая задача геотермии в точках $Z = 1540 \text{ м}$, 2540 м , 3040 м при тепловом потоке через основание $q_1 = 76 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$).

К тестированию решения обратной задачи на модели

Точное значение теплового потока через основание, $\text{Вт}/\text{м}^2$	Начальное приближение, $\text{Вт}/\text{м}^2$		Решение по точным "наблюдаемым" температурам, $\text{Вт}/\text{м}^2$		Решение по "наблюдениям" с погрешностью 5%, $\text{Вт}/\text{м}^2$		Решение по "наблюдениям" с погрешностью 15%, $\text{Вт}/\text{м}^2$	
	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка
$76.0 \cdot 10^{-3}$	$30.0 \cdot 10^{-3}$	$46.0 \cdot 10^{-3}$	$76.0 \cdot 10^{-3}$	0.0	$76.2 \cdot 10^{-3}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$78.9 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$
"Невязка" по температуре, °С	±19.0		±0.0		±1.3		±3.8	
Ошибка в расчете теплового потока, %	60.0		0.0		0.3		3.8	
Время счета, с			7		7		7	

По "наблюдаемым" температурам решалась обратная задача относительно q_1 . В качестве начального приближения принималось $q_1 = 30 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2$ - значение, близкое к минимальным значениям теплового потока на поверхности осадков. Задача решалась как по точным "наблюдениям", так и по "наблюдениям" с ошибкой 5% и 15% (табл. 3).

Как следует из результатов, при уменьшении ошибки в наблюдаемых температурах ошибка расчета теплового потока через основание стремится к нулю. Это свидетельствует об устойчивости расчетов к ошибкам в исходных данных. Сами ошибки расчетов вполне приемлемы.

ПРОГНОЗ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СКОПЛЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В ОСАДОЧНОМ РАЗРЕЗЕ

Ниже приводятся результаты палеопроектирования на линии сейсмопрофиля 212 в Лунском прогибе Сахалина. Современный разрез профиля неполный (рис. 3). В нем отсутствует нутовская свита, не полностью представлены окобыкайская и дагинская свиты. Верхняя часть кайнозойского разреза была уничтожена современной эрозией (А.А. Жилияков, 1989).

Максимальной мощности осадочный разрез достигал в конце нутовского времени. По нутовскому палеоразрезу рассчитывались скорости осадконакопления каждой толщи, необходимые для расчетов палеотемпературных разрезов.

Тепловой поток через поверхность подстилающего основания, принимаемый за *const*, оценивался путем решения обратной задачи. Необходимые для этого определения температур были выполнены на трех горизонтах в скв. 6-П (Полярнинская площадь): 1000 м - 36.1°C; 2000 м - 64.4°C; 2456 м - 77.6°C. Средняя теплопроводность и теплогенерация осадков в соответствии с литологическим описанием разреза принимались $1.5 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{°С}$ и $12.2 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}/\text{м}^3$. Тепловой поток, поступающий в осадки из основания, получился равным $71.3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2$. При этом "невязка" расчетных значений температур и наблюдаемых составила +5°C.

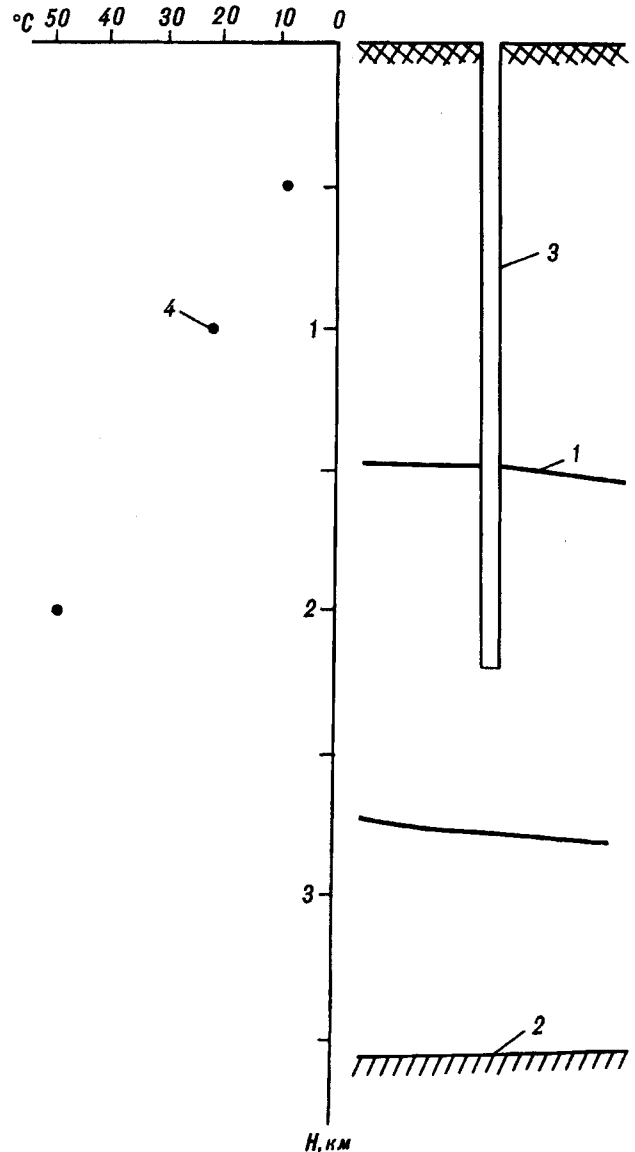


Рис. 2. К решению обратной задачи геотермии на модели.

1 - стратиграфическая граница; 2 - поверхность основания; 3 - скважина; 4 - "наблюдения" температур в скважине.

Таким образом, оценив параметры: v - скорость и Δt - временной интервал осадконакопления каждой свиты; λ - теплопроводность и a - температуропроводность разреза; A_0 - удельную теплогенерацию осадков; q_1 - тепловой поток через основание, мы

решаем прямую задачу геотермии - определяем температуры U в осадочной толще в заданные моменты времени t (на конец формирования каждой свиты) с заданной дискретностью по глубине Z .

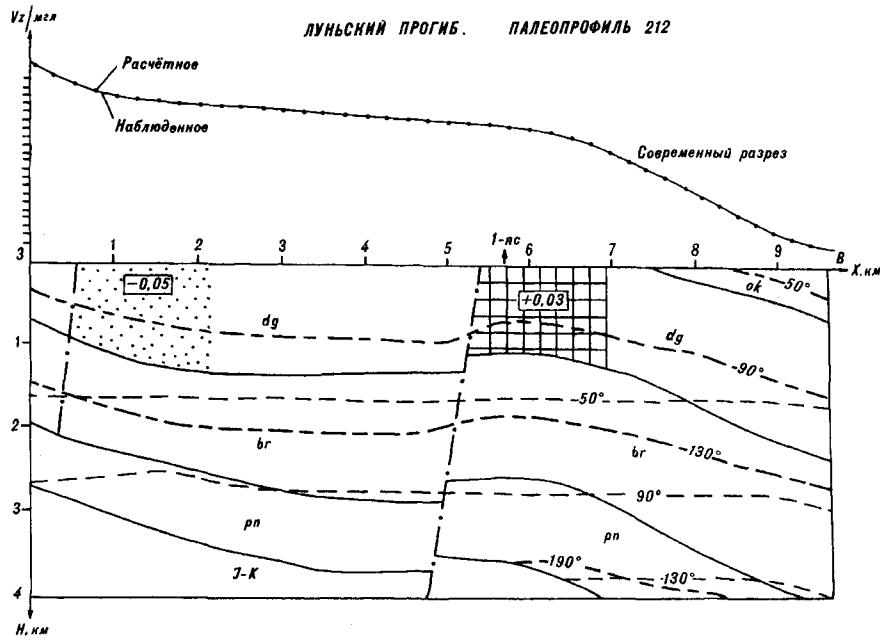


Рис. 3. Палеотемпературные реконструкции на линии сейсмопрофиля 112 в Луньском прогибе на Сахалине.

nt, ok, dg, br, pn - свиты кайнозойских осадков; J-K - мезозойское основание. На современном разрезе штрихпунктиром нанесены изотермы максимальных палеотемператур. Нанесены выявленные геоплотностным моделированием области разуплотнения (крапом) и уплотнения (сеткой). $1^\circ \text{C}/\text{см}^2$.

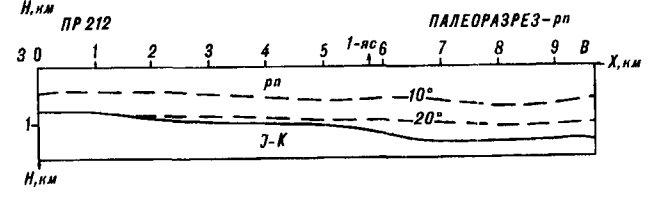
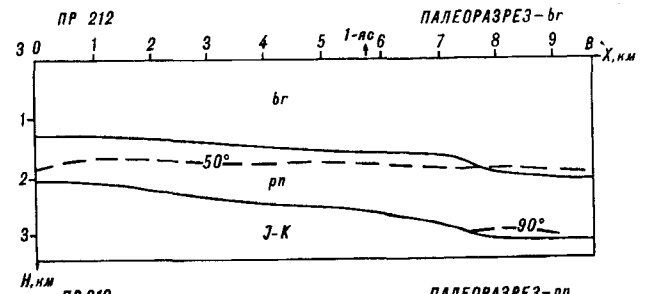
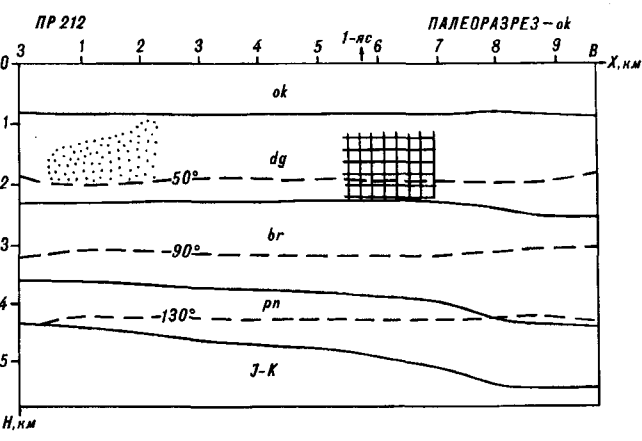
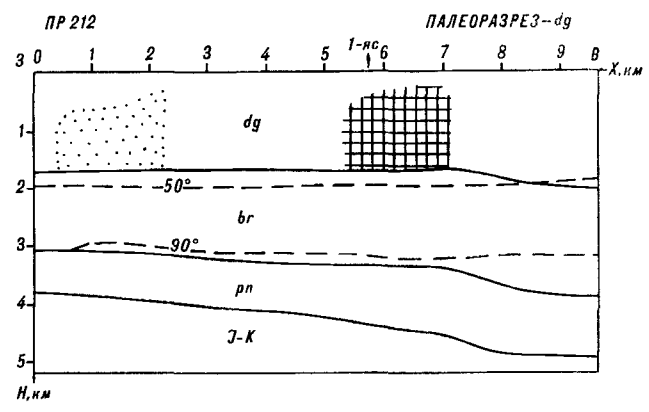
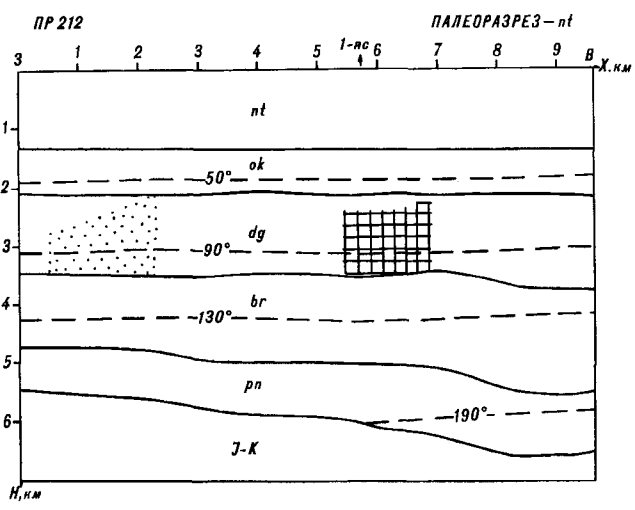


Рисунок 3 - это почти полная* иллюстрация палеопрфилирования на примере профиля 112. Здесь сделана попытка представить для совместного анализа (в динамике) два изученных нами признака перспективности разреза на наличие залежи УВ: благоприятный температурный интервал (генерация и сохранение соответствующей фазы УВ) и локальное разуплотнение (уплотнение) толщи (аккумуляция УВ в зоне с улучшенными коллекторскими свойствами или экранирование).

Нутовскому времени (конец неогена) соответствует максимальная прогретость осадочной толщи. Поэтому наибольший интерес для характеристики температурных условий представляет нутовский палеотемпературный разрез. Наложение его на современный разрез определяет положение основных зон нефте- и газообразования в современном разрезе.

Если катагенетическую зональность принимать по [10, 14], то прогноз фазового состояния возможных скоплений углеводородов (in situ) в кайнозойских отложениях заключается в следующем.

Температурные условия, соответствующие верхней зоне газообразования (50 - 90°C), отмечаются в толще, охватывающей нижнюю половину окобыкских отложений и верхнюю половину дагинских. Главная зона нефтеобразования (90 - 130°C) приурочена к нижней половине дагинских отложений и к верхней половине борских отложений. Нижняя зона газообразования (130 - 190°C) приурочена к нижней половине борских отложений и пиленгским отложениям. Разрушительные для углеводородов температуры (более 190°C) отмечаются в нижней части пиленгских отложений.

Испытания скв. 1 Ясынгинская, расположенной на профиле 112, выявили газоносный горизонт на глубине 1937-1990 м (начало нижней половины борских отложений) и нефтеводоносный горизонт на глубине 1686-1742 м (верхняя половина борских отложений), что согласуется с палеотемпературным прогнозом фазового состояния углеводородов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для решения прямой задачи геотермии в условиях седиментации, сформулированной на основе постановки и базовых уравнений А.Я. Гольмштока, создана программа ЭВМ. В алгоритме программы ряд громоздких интегралов сведен к явному виду, реализованы процедуры, позволяющие получить распределение температур в осадочной толще с заранее заданной точностью вычислений.

2. Для решения обратной задачи геотермии в условиях седиментации создана программа ЭВМ,

реализующая алгоритм квадратичного программирования В.И. Старостенко. Применение программы позволяет количественно оценить по данным скважинной геотермии фундаментальный геодинамический параметр - неискаженный осадконакоплением тепловой поток через поверхность основания с погрешностью вычислений в пределах 4%.

3. Приведен практический пример применения программного комплекса для осуществления палеопрфилирования с целью прогнозирования фазового состояния углеводородов в осадочных толщах.

Одномерность реализованной модели осадконакопления являлся фактором, требующим учета при ее применении. Основное назначение программного комплекса - это палеопрфилирование осадочного бассейна в целом, когда линейные размеры профилей много больше их глубины. В этом случае погрешности, обусловленные одномерностью модели, не должны быть существенными.

Благодарим А.Я. Гольмштока и Я.Б. Смирнова за консультации и тестовые материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987.
2. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наук. думка, 1986.
3. Галушкин Ю.И., Смирнов Я.Б. Термическая история осадочных бассейнов; экспресс-методы оценки теплового потока // Геология и геофизика. 1987. № 11. С. 105-112.
4. Геотермические условия развития цикла нефтегазообразования / Максимов С.П., Калинин М.К., Бортнева Т.А., Молодых Г.Н. // Геология нефти и газа, 1975. № 11. С. 35-41.
5. Гольмшток А.Я. Тепловой поток в накапливающихся осадках // Геотермические исследования на дне акваторий. М.: Наука, 1988. С. 74-88.
6. Главная фаза нефтеобразования / Вассоевич А.Б., Корчагина Ю.И., Лопатин Н.В., Чернышев В.В. // Вестник МГУ. Геология. 1969. № 6, С. 3-27.
7. Исаев В.И., Хростовская Н.В. О реализации на ЕС ЭВМ метода математического программирования для решения обратной задачи гравиметрии в линейной постановке // Разведочная геофизика: теория, методика, результаты. Киев: Наук. думка, 1984. С. 156-171.
8. Калиткин Н.А. Численные методы. М.: Наука, 1978.
9. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
10. Контарович А.Э., Трофимчук А.А. К методике изучения истории залежей нефти и газа // Геология нефти и газа. 1973. № 7. С. 18-24.
11. Кутас Р.И. Определение температур в земной коре и роль осадочного слоя в формировании геотермического режима // Геофизический сборник. 1965. Вып. 12. С. 12-19.
12. Кутас Р.И., Цвященко В.А. Влияние осадконакопления на тепловое поле Черноморской впадины // Геофизический журнал. 1993. № 1. С. 23-35.

* В данной статье не рассматриваются вопросы компьютерной методики сопряженных палеотектонических реконструкций, учитывающих следствия седиментационных и постседиментационных процессов

13. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ. Выпуск 4. Минск: Институт математики БССР, 1974.
14. *Нестеров И.И., Шпильман В.И.* Теория нефтегазонакопления. М.: Недра. 1987.
15. *Старостенко В.И.* Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии. Киев: Наук. думка, 1978.
16. Эволюция температурного поля осадочного чехла северной части Западно-Сибирской плиты / Дучков А.Д., Галушкин Ю.И., Смирнов Л.В., Соколова Л.С. // Геология

и геофизика. 1990. № 10. С. 51-60.

17. *Benfield A.E.* The effect of the uplift and denudation on underground temperatures // J. Appl. Phys. 1949. V. 20, № 1. P. 35-49.

18. *Birch F., Roy R.F., Decker E.R.* Heat flow and thermal history in new England and New York // Studies of Appalachiah geology; northerh and maritime. 1968. P. 437-451.

*Центр геологических исследований
и информатики "Информгеоцентр"*

г. Южно-Сахалинск

*Поступила в редакцию
28 июля 1994 г.*

V.I. Isaev, N.A. Volkova, T.V. Nim

SOLUTION OF DIRECT AND INVERSE PROBLEMS OF THE GEOTHERMY IN THE SEDIMENTATION CONDITIONS

On the basis of the problem formulation and basic Gol'mshtok's equation, direct problem of geothermy in sedimentation conditions has been programmed on a computer. The program includes the temperature distribution calculation in the sedimentary series at any prescribed moment of the geological time. A range of integrals has been transformed to the explicit form and numerical integration has been made with the given accuracy. An inverse problem has been formulated, which calculates heat flow undistorted by sedimentation from the basement on the basis of the temperature observation in the well. Starostenko's quadratic programming method has been used for solving inverse problem on computer, miscalculation in the limits of 4%. The program efficiency is illustrated by model examples and solution of the problem of the paleotemperature estimation of hydrocarbon phase state.